Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 2, June. July. 2020, p. 271- 286

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 2، خرداد- تیر 1399 ص. 286-271

بررسی تأثیر فرایند هیدروترمال بر خواص رئولوژیکی بتاگلوکان یولاف

اعظم ستاری[1]- جعفر محمدزاده میلانی[2*]- زینب رفتنی امیری[2]- علی پاکدین پاریزی[3]

تاریخ دریافت: 1398/05/27
تاریخ پذیرش: 1398/07/17

چکیده

بتاگلوکان یک پلی‌ساکارید خطی، بدون انشعاب، غیرنشاسته‌ای و محلول در آب است که در دیواره سلولی غلات به‌ویژه یولاف وجود دارد. با توجه به تأثیر فعالیت آنزیمی بر پایداری لیپیدهای یولاف لازم است که این آنزیم‌ها در طی فرآوری یولاف غیرفعال شوند. یکی از روش‌های موجود برای غیرفعال کردن آنزیم‌ها، فرآیند هیدروترمال است. در این پژوهش فرایند هیدروترمال با اتوکلاو در دماهای110 ، 120 و 130 درجه سانتی‌گراد در دو زمان 10 و 20 دقیقه بر روی آرد یولاف انجام شد و بتاگلوکان استخراجی از آن به روش آبی از نظر خواص فیزیکو شیمیایی و عملکردی و نیز رئولوژیکی مورد برررسی قرار گرفت. بتاگلوکان حاصل از آرد یولاف هیدروترمال شده در 120 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه بالاترین حلالیت را در 25 درجه سانتی‌گراد و کمترین حلالیت را در دمای 50 درجه سانتی‌گراد و تیمار 120 درجه سانتی‌گراد به مدت 20 دقیقه بیشترین حلالیت را در 75 درجه سانتی‌گراد داشت. میزان کف‌کنندگی بتاگلوکان استخراجی از آرد یولاف هیدروترمال شده در دمای 130درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه، از سایر تیمارها کمتر بود و بتاگلوکان حاصل از تیمار هیدروترمال شده در دمای 110 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه از ثبات کف بالاتری برخوردار بود. در بررسی خصوصیات رئولوژیکی، تاثیر سرعت برشی بر میزان ویسکوزیته نشان داد که با افزایش سرعت برشی، میزان ویسکوزیته در تمامی نمونه‌ها کاهش یافت و بیشترین مقدار ویسکوزیته را بتاگلوکان حاصل از آرد یولاف هیدروترمال شده در دمای 120 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه داشت. در آزمون نوسانی شامل روبش دما، پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل مدول الاستیک G' و مدول ویسکوز G'' بودند که مقدار G' و G'' در نمونه بتاگلوکان استخراجی از آرد یولاف هیدروترمال شده در تمامی نمونه‌ها کاهش یافت و نیز مدول الاستیک و ویسکوز بتاگلوکان استخراج شده از آرد هیدروترمال شده در دمای 120 درجه به مدت 10 دقیقه از سایر تیمارها بیشتر بود. در روبش فرکانس در فرکانس‌های پایین‌تر، G'' از G' بزرگتر است و هر دو با افزایش فرکانس افزایش می‌یابند و مقدار G' و G'' و η^* بتاگلوکان استخراج شده از آرد هیدروترمال شده در دمای 120 درجه به مدت 10 دقیقه از سایر تیمارها در فرکانس 1 و 10 هرتز بیشتر بود.

واژه‌های کلیدی: بتاگلوکان، یولاف، فرآیند هیدروترمال، خصوصیات رئولوژیکی

مقدمه

یولاف یکی از غلات سرشار از فیبرهای محلول مانند بتاگلوکان است و یک منبع خوب از پروتئین، ویتامین‌ها و مواد معدنی است (Butt *et al*, 2008). ساختمان شیمیایی یولاف به عوامل متعددی همچون رقم و نوع گیاه و شرایط محیطی بستگی داشته و به‌طور کلی شامل کربوهیدرات، پروتئین، چربی و خاکستر می‌باشد. کربوهیدرات ترکیب اصلی یولاف می‌باشد که بیشترین مقدار را به‌خود اختصاص می‌دهد. چربی دانه یولاف تقریبا 7 درصد است و مقدار پروتئین آن تقریبا 12-24 درصد است و همچنین حاوی پنتوتنیک اسید، فولات، کلسیم، آهن، منیزیم، پتاسیم و نیز فیبرهای رژیمی و فیبرهای محلول در آب مانند بتاگلوکان است. علاوه بر این یولاف منبع غنی از آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی مانند توکوفرول و فنولیک اسید و مشتقات مربوط به آن است (Mattila *et al*, 2005).

مقدار یولاف مصرفی انسان به علت مزایای رژیم غذایی و ارزش غذایی آن رو به افزایش است. در واقع اثرات سلامتی‌بخش یولاف، به‌خاطر مقدار کل فیبرهای رژیمی و محتوای بتاگلوکان آن است (Kerchhoffs *et al*, 2002).

بتاگلوکان پلی‌ساکاریدی است که در دیواره سلول‌های آندوسپرم و سلول‌های آلرون وجود دارد. این مولکول از بسپارهای خطی همگن تشکیل شده است که متشکل از واحدهای گلوکوپیرانوز است که توسط پیوندهای متوالی (4و 1) به یکدیگر متصل و توسط یک پیوند (3و 1) از یکدیگر فاصله گرفته‌اند (Liu *et al*, 2006). بتاگلوکان غلات

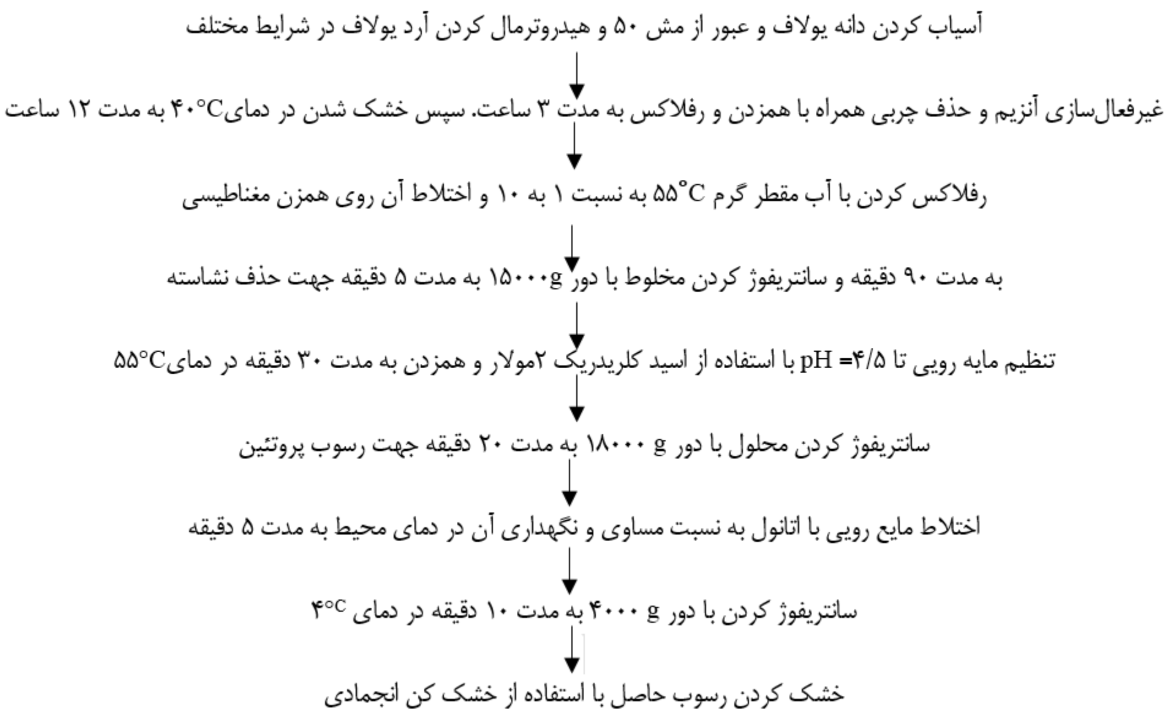
1 و 2- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
3- استادیار، پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
(*-نویسنده مسئول: Email: jmilany@yahoo.com)
DOI: 10.22067/ifstrj.v16i2.82524

بسپارهایی با وزن مولکولی بالا می‌باشند که مقدار وزن مولکولی آنها متاثر از روش‌های استخراج و حلال‌های مورد استفاده برای استخراج و غیرفعال‌سازی آنزیم‌های دانه قبل از استخراج می‌باشد (Izydorczyk *et al*, 2008) بتاگلوکان همانند آرابینوگزیلان‌ها و صمغ‌های گیاهی و الیگوساکاریدها جزء فیبرهای محلول است. فیبرهای محلول نقش مهمی را در مجرای گوارشی ایفا می‌کنند که برای سلامتی روده بزرگ مفید می‌باشند و نیز در کاهش بسیاری از بیماری‌های قلبی و عروقی، دیابت، چاقی، سرطان روده و بیماری‌های گوارشی و افزایش قدرت دفاعی بدن و نیز بر روی سلامتی پوست مؤثر است (Wood, 2007; Lazaridou & Biliaderis, 2007). مقدار بتاگلوکان در جو 7- 3 درصد و در یولاف11- 5 درصد و گندم حدود 1/2 درصد می‌باشد (Brennana *et al*, 2005).

بتاگلوکان هیدروکلوئید اصلی موجود در غلات و مخمرهاست که توانایی تشکیل ژل داشته و باعث افزایش ویسکوزیته محلول می‌شود. از این‌رو می‌توان به‌عنوان عامل قوام‌دهنده در تولید مواد غذایی عملگرا و یا به‌عنوان جایگزین چربی جهت بهبود بافت و ویژگی‌های فیزیکی محصولات کم‌چرب در فرمولاسیون آن‌ها استفاده شود (Lazaridou & Biliaderis, 2007). دانه یولاف منبع خوبی از پروتئین‌هاست و حاوی اسیدهای چرب غیراشباع، ترکیبات فنولیک، فیبر رژیمی و نشاسته است. دانه یولاف 5 -2 برابر چربی بیشتر از گندم دارد و غنی از لیپاز، لیپواکسیداز و دیگر آنزیم‌های هیدرولیتیک است. با گذشت زمان، آنزیم‌ها به هیدرولیز چربی‌های حاضر در دانه یولاف منجر می‌شوند که باعث ایجاد طعم تند می‌شوند. با توجه به تاثیر فعالیت آنزیمی بر پایداری لیپیدهای یولاف لازم است که این آنزیم‌ها در طی فرآوری یولاف غیرفعال شوند. یکی از روش‌های موجود برای غیرفعال‌کردن آنزیم‌ها، فرایند هیدروترمال است (Doehlert *et al*, 2010) که شامل اعمال بخار در شرایط معمولی و یا در اتوکلاو است. در پژوهش حاضر سعی شده است تا اثر فرایند هیدروترمال با اتوکلاو بر آرد یولاف و بتاگلوکان استخراجی از آن از نظر خواص فیزیکوشیمیایی، عملکردی و رئولوژیکی مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های دانه کامل یولاف پوست کنده از شرکت جام نور طلایی خریداری شد. جهت تهیه آرد، دانه‌های یولاف با آسیاب آزمایشگاهی Magic Bullet مدل (NH21PCS) آرد شده و از الک با مش 50 عبور داده شدند. سپس در بسته‌های پلاستیکی غیرقابل نفوذ به رطوبت بسته‌بندی و در فریزر -20°C تا انجام آزمایشات نگهداری شدند.



شکل 1- مراحل استخراج بتاگلوکان یولاف به روش آبی

ترکیب شیمیایی یولاف

به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت و خاکستر و پروتئین آرد یولاف از روش استاندارد (AOAC، 2005) استفاده شد. میزان چربی آرد یولاف از روش استاندارد AACC به شماره 25- 30 اندازه‌گیری شد. مقدار نشاسته نیز به روش پلاریمتری تعیین گردید (Horwitz, 2002).

فرایند هیدروترمال

در این پژوهش فرایند هیدروترمال با اتوکلاو در دماهای 110، 120 و 130 درجه سانتی‌گراد در دو زمان 10 و 20 دقیقه بر روی آرد یولاف صورت گرفت.

استخراج بتاگلوکان

با توجه به نمودار 1، فیبر رژیمی بتاگلوکان به‌روش آبی توسط روش Skendi و همکاران (2003) و Ahmad و همکاران (2009) با کمی تغییر از آرد یولاف استخراج شد. در این استخراج از آب مقطر با دمای 55 درجه سانتی‌گراد استفاده شد و اختلاط آب و آرد در این دما به مدت 90 دقیقه صورت گرفت

حلالیت

مطابق روش Ancona و همکاران (2003) پس از تهیه 90 میلی‌لیتر محلول 1 درصد (وزنی/ حجمی) از هر بتاگلوکان، نمونه به 3 قسمت مساوی تقسیم شد. سپس هر یک به‌طور جداگانه در حمام آب گرم 25، 50 و 75 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه قرار گرفت و هم‌زده شد. سپس با دور 8000g به مدت 15 دقیقه سانتریفوژ شد. در ادامه مقدار 10 میلی‌لیتر از محلول زلال فوقانی به آون 125 درجه سانتی‌گراد انتقال داده شد تا به وزن ثابت رسید. در نهایت از فرمول زیر برای تعیین درصد حلالیت در دماهای مختلف استفاده شد:

(1) 100 × (وزن اولیه نمونه / وزن نهایی پس از خشک کردن)=درصد حلالیت

قابلیت تشکیل و پایداری کف

قابلیت تشکیل و پایداری کف با روش ارائه شده توسط Temelli (1997) اندازه‌گیری شد. در این روش 2/5 گرم بتاگلوکان در 100 میلی‌لیتر آب مقطر حل شد و پس از یکنواخت شدن محلول با استفاده از همزن برقی به مدت 2 دقیقه به شدت مخلوط شد. حجم نمونه قبل و بعد از هم‌زدن اندازه‌گیری شد و درصد افزایش حجم به‌عنوان شاخصی از ظرفیت تولید کف با استفاده از فرمول زیر تعیین شد:

(2) 100 ×حجم اولیه نمونه / حجم اولیه محلول- حجم ثانویه محلول پس از اختلاط = درصد افزایش حجم

جهت تعیین پایداری کف، پس از انتقال محلول به استوانه مدرج، حجم کف باقی‌مانده پس از 2 ساعت در دمای 25 سانتی‌گراد به‌عنوان درصدی از حجم اولیه بیان می‌شود (Temelli 1997 ; khan 2016).

(3) 100 ×حجم اولیه کف /حجم کف بعد از زمان 120 دقیقه = (درصد) پایداری کف

ویژگی‌های رئولوژیکی

محلول بتاگلوکان با غلظت 1 درصد (وزنی/ وزنی) آماده شد (Burkus and Temelli, 1998). آزمون رئولوژیکی محلول بتاگلوکان با استفاده از رئومتر (Anton، MCR301، آلمان) و رئومتر double gap در دمای 20 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. برای تنظیم دما، سیستم Peltier paar مجهز به سیرکولاتور آب به‌کار گرفته شد. محلول‌ها برای تمام اندازه‌گیری رئولوژیکی در ویال‌های شیشه‌ای مهر و موم شده غیرقابل نفوذ با همزدن ملایم نمونه‌های بتاگلوکان، در آب دوباره تقطیر شده در دمای 75 درجه سانتی‌گراد تا انحلال کامل مواد آماده شدند.

آزمون رئولوژیک شامل آزمون پایا و آزمون نوسانی انجام گرفت.

آزمون برشی پایا

رفتار جریانی نمونه‌ها پس از 5 دقیقه استراحت به‌صورت یک مرحله‌ای رفت صورت گرفت و نمودارها توسط نرم‌افزار Rheoplus نسخه 3/2 ثبت شدند. داده‌ها در مقیاس لگاریتمی (به‌منظور کاهش شتاب اولیه و اثر اینرسی دستگاه) براساس ویسکوزیته به‌صورت تابعی از نرخ برشی رسم شدند. تمام اندازه‌گیری‌ها در دو تکرار انجام گرفت. مدل‌های قانون توان یا اسوالد، هرشل بالکلی و بینگهام در محدوده نرخ برش آزمون شده در داده‌ها از طریق نرم افزار دستگاه رئومتر برازش شدند.

روابط مدل‌های برازش شده در زیر آمده‌است (Alghooneh *et al*, 2017).

(4) مدل قانون توان یا اسوالد $\sigma = K(\dot{\Upsilon})^{n}$

که σ تنش برشی (Pa)، $\dot{\Upsilon}$ نرخ برشی(1/s) که متناسب با یکدیگر هستند و K اندیس قوام ($pa.s^n$) و n اندیس رفتار جریانی می‌باشد.

(5) مدل هرشل بالکلی $\sigma = \sigma_\beta + K(\dot{\Upsilon})^{n}$

که σ_0 تنش تسلیم (pa) می‌باشد. زمانی‌که $\sigma_0 = 0$ است، رابطه هرشل بالکلی به مدل سیال توان تبدیل می‌شود و وقتی n=1 رابطه به مدل بینگهام تبدیل می‌شود.

(6) مدل بینگهام $\sigma = \sigma_0 + \eta_p \dot{\Upsilon}$

آزمون‌های نوسانی

آزمون روبش دما

برای اندازه‌گیری روبش دما نمونه‌ها از 20 تا 85 درجه سانتی‌گراد گرم شدند سپس از دمای 85 تا 20 درجه سانتی گراد با فرکانس 1 هرتز و فشار 0/1 درصد خنک شدند. گرمایش و خنک کردن با سرعت 3 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انجام شد (بهروزیان و همکاران، 2017). مدول ذخیره و مدول افت به‌عنوان تابعی از دما بررسی و محاسبه شد.

روبش فرکانس

آزمون جابجایی فرکانس در محدوده 0/1 تا 100 هرتز (20 درجه سانتی‌گراد) انجام شد. طیف به‌دست آمده با استفاده از مدول ذخیره (G′) و مدول افت (G″) رسم شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تمامی نتایج حاصل از این پژوهش بر پایه طرح کاملا تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. هر آزمون در 3 تکرار صورت گرفت. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال 5 درصد استفاده شد و در نهایت رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار اکسل صورت گرفت.

نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی آرد یولاف

در ترکیب شیمیایی یولاف، نشاسته و پروتئین به‌عنوان مهم‌ترین اجزای آرد دیده شد. ترکیب شیمیایی یولاف، نشان داد که میزان نشاسته (61/2)، پروتئین (9/5)، چربی (7/01)، رطوبت (10/7) و مقدار خاکستر (1/69) درصد بود (اعداد میانگین 3 تکرار هستند). Grundy و همکاران (2017) مقدار چربی آرد یولاف را 9/6 درصد، پروتئین را 11/5 درصد، مقدار نشاسته را 60/3 درصد، رطوبت را 10/4 درصد و مقدار خاکستر را 1/7 درصد بیان کردند.

حلالیت

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که میزان حلالیت نمونه‌های استخراج شده با دما و زمان‌های مختلف در دمای 25، 50 و 75 سانتی‌گراد دارای اختلاف معنی‌دار بود. مطابق نتایج به‌دست‌آمده نمونه C بالاترین حلالیت را در 25 سانتی‌گراد داشت و کمترین حلالیت را در دمای 50 سانتی‌گراد و نمونه F بیشترین حلالیت را در 75 سانتی‌گراد داشت. ساختار مولکولی این پلی‌ساکاریدها، ترکیب و ویژگی‌های دیواره سلولی از جمله عواملی هستند که روی حلالیت بتاگلوکان تاثیر می‌گذارند. بتاگلوکان‌هایی با وزن مولکولی زیاد، دارای زنجیره‌های طولانی‌تر و حجم هیدرودینامیکی بیشتری هستند، بنابراین توانایی کمتری برای اتصالات بین مولکولی دارند و برعکس، بتاگلوکان با وزن مولکولی کم امکان بیشتری برای تغییر رفتار مکانیکی دارد (Skendi *et al*,2009). این تفاوت در حلالیت، احتمالا به‌خاطر تفاوت در وزن مولکولی تیمارهای مختلف است که هرچه وزن مولکولی پایین‌تر باشد دارای زنجیره‌های کوتاهتر و حجم هیدرودینامیکی کمتری هستند، بنابراین توانایی بیشتری برای اتصالات بین مولکولی دارند. Gamel و همکاران (2014) اثرآمیلاز، پروتئاز و لیپاز را روی مقدار حلالیت بتاگلوکان استخراج شده از یولاف و بازده غلظت بتاگلوکان و وزن مولکولی آن را مورد بررسی قرار دادند. افزودن لیپاز بر روی ویسکوزیته و حلالیت بتاگلوکان استخراج شده از یولاف به‌طور قابل ملاحظه‌ای تاثیر می‌گذارد. حلالیت اجزای فیبرهای رژیمی یولاف یکی از عوامل تعیین‌کننده خواص تکنولوژیکی و اثرات مفید فیزیولوژیکی آن‌ها به حساب می‌آید.

جدول 1- میانگین درصد حلالیت‌های تیمارهای بتاگلوکان در دماهای 25، 50 و 75 درجه سانتی‌گراد

تیمار	25°C	50°C	75°C
A	30/74±4/56^{cb}	21/22±0/79^{b}	23/06±0/53^{cd}
B	23/21±4/66^{c}	29/22±3/76^{a}	35/20±7/94^{b}
C	40/71±6/44^{a}	8/62±0/06^{e}	19/46±1/20^{cd}
D	38/85±8/05^{ab}	13/57±1/75^{d}	30/08±5/75^{bc}
E	25/41±1/2^{c}	26/95±2/9^{a}	12/90±2/1^{c}
F	29/08±6/15^{c}	16/28±0/53^{cd}	44/67±5/14^{a}
G	30/32±2/61^{bc}	18/87±1/46^{bc}	25/25±4^{cd}

A) کنترل، **B**) دقیقه 10- 110°C، **C**) دقیقه 10- 120°C، **D**) دقیقه 10- 130°C، **E**) دقیقه 20- 110°C، **F**) دقیقه 20- 120°C، **G**) دقیقه 20- 130°C

*حروف یکسان در هر ستون، نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح 5 درصد است.

اندازه‌گیری درصد کف‌کنندگی و پایداری کف

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که مقدار کف‌کنندگی و پایداری کف تیمارهای بتاگلوکان استخراجی از آرد هیدروترمال شده در دما و زمان‌های مختلف دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ($P<0.05$) بود. مقدار کف‌کنندگی نمونه D از سایر نمونه‌ها کمتر بود. نمونه B از ثبات کف بالاتری برخوردار بود. عامل کف‌کنندگی و پایداری کف یکی از ویژگی‌های عملکردی مهم بتاگلوکان جهت استفاده از آن به عنوان ترکیب بهبود دهنده بافت فراورده‌های نانوایی می‌باشد. به این دلیل که هر چه میزان کف‌کنندگی و پایداری کف بیشتر باشد، جهت استفاده در فرمولاسیون خمیر نان و کیک مناسب‌تر است. در همین راستا Skendi و همکاران (2008) با افزودن بتاگلوکان جو به آرد با کیفیت باعث بهبود ویژگی های نان تولیدی در مقایسه با نمونه کنترل شدند. پورمحمدی و همکاران (1390) ضمن جایگزینی مقداری از آرد گندم با آرد جو بدون پوشینه موجب بهبود ارزش غذایی نان شدند، که علت آن را حضور بتاگلوکان جو بدون پوشینه گزارش کردند.

جدول 2- میانگین درصد کف کنندگی و پایداری کف تیمارهای بتاگلوکان

تیمار	کف کنندگی (%)	پایداری کف (%)
A	$47±7^{a}$	$83/64±8/19^{a}$
B	$24±4^{b}$	100^{a}
C	$43±11^{a}$	$98/59±0/11^{ab}$
D	44^{a}	$96/87±0/35^{ab}$
E	$45±5^{a}$	$90/03±9^{bc}$
F	$52±8^{a}$	$94/18±2/99^{ab}$
G	$8/66±1/53^{e}$	$97/82±1/92^{ab}$

A) کنترل، **B**) دقیقه 10- 110°C، **C**) دقیقه 10- 120°C، **D**) دقیقه 10- 130°C، **E**) دقیقه 20- 110°C، **F**) دقیقه 20- 120°C، **G**) دقیقه 20- 130°C

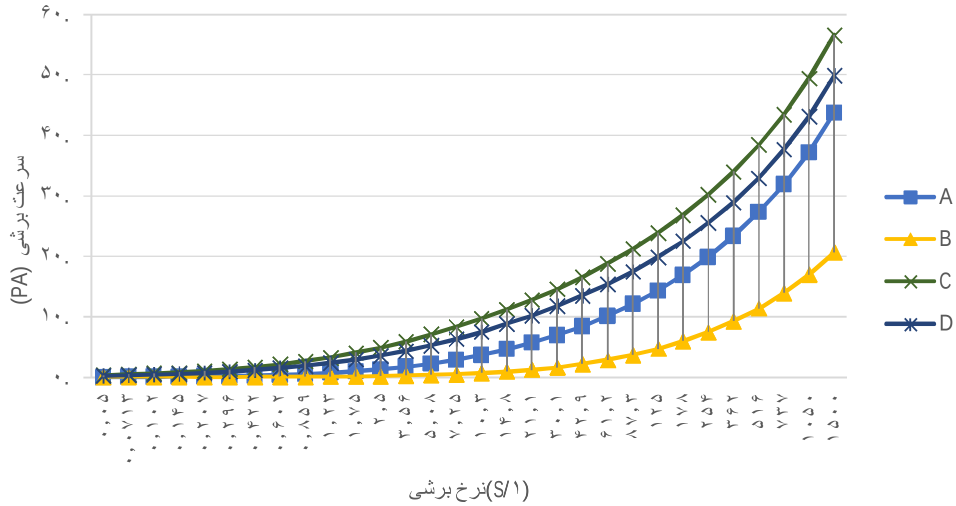
*حروف یکسان در هر ستون، نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح 5 درصد است.

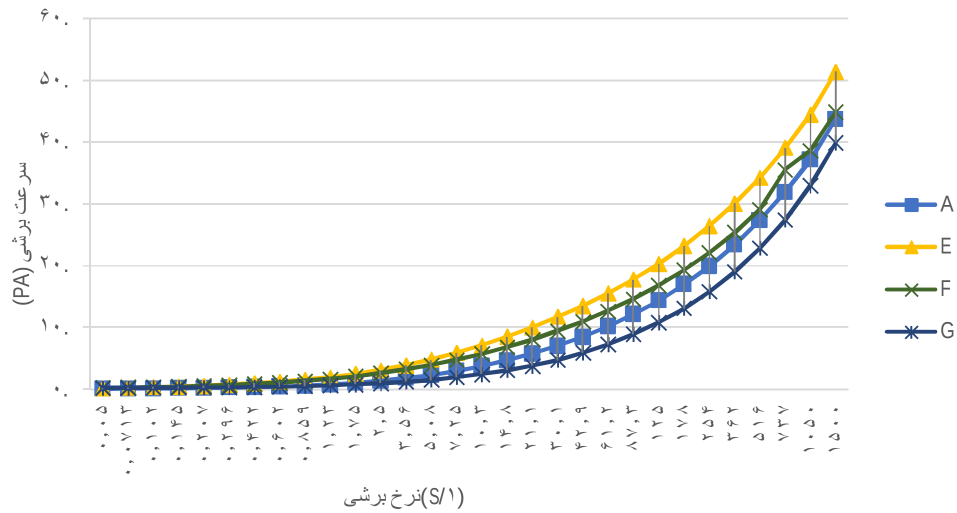
خصوصیات رئولوژیکی

آزمون پایا

روند تغییرات تنش برشی را به سرعت برش در شکل 2 نشان داده شده است که رفتار رقیق‌شونده با برش را به نمایش گذاشتند. Ryu و همکاران (2012) نیز گزارش دادند که محلول غلظت 3 درصد بتاگلوکان از جو و یولاف غیرنیوتنی بوده و رفتار رقیق‌شونده با برش را نشان می‌دهند. Burkus و همکاران (2005) با مقایسه ویژگی‌های رئولوژیکی محلول بتاگلوکان آزمایشگاهی و بتاگلوکان نیمه‌صنعتی نشان دادند که این هیدروکلوئید رفتار رقیق‌شونده با برش دارد.

روند تغییرات ویسکوزیته ظاهری با افزایش سرعت برشی در نمونه‌های صمغ بتاگلوکان استخراج شده از تیمارهای مختلف هیدروترمال شده در شکل 3 نشان داده شده است. نمودار ویسکوزیته- سرعت برشی نمونه‌ها مبین رفتار سودوپلاستیسیته نمونه‌ها در تمامی محدوده نرخ برشی می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که نمونه C در تمامی سرعت‌های برشی به‌ویژه در سرعت برشی $50\ s^{-1}$ (سرعت برشی ایجاد شده در دهان) بیشترین میزان ویسکوزیته را داراست (Karaman *et al*, 2011). در سرعت‌های برشی پایین، نیروهای هیدرودینامیکی کوچک قادر به تشکیل لخته‌ها نبوده و ویسکوزیته بتاگلوکان بیشترین میزان خود را دارد. با افزایش سرعت برشی، نیروهای هیدرودینامیک موجب تغییر شکل توده و به‌تدریج تخریب آنها در نمونه‌ها شده و در نتیجه منجر به کاهش ویسکوزیته بتاگلوکان می‌گردد (Castellani and Al Assaf,2010; Mandala *et al*, 2004). تاثیر سرعت برشی بر میزان ویسکوزیته نشان داد که با افزایش سرعت برشی، میزان ویسکوزیته ظاهری در تمامی نمونه‌ها کاهش یافت. کاهش ویسکوزیته با افزایش سرعت برشی، نشان‌دهنده خصوصیت رفتار رقیق‌شونده با برش (سودوپلاستیک) صمغ بتاگلوکان می‌باشد. این رفتار برای بیشتر محلول‌های هیدروکلوئیدی قابل مشاهده است که می‌تواند به دلیل قرار گرفتن مولکول‌ها در جهت برش باشد. در واقع با افزایش سرعت برش، پلیمرهایی که دارای زنجیره‌های بلند هستند و به صورت تصادفی و به‌هم ریخته قرار دارند، به‌صورت ردیفی در جهت جریان قرار گرفته و باعث کاهش اتصالات زنجیره‌های جانبی پلیمر با یکدیگر و جدا شدن زنجیره‌های پلیمری درگیر در اثر نیروهای هیدرودینامیکی می‌شوند که این پدیده منجر به کاهش ویسکوزیته می‌شود (Worrasinchai *et al*, 2006). به‌طور کلی مواردی نظیر وزن مولکولی، میزان زنجیره‌های جانبی، طول زنجیره‌ها و شکل فضایی پلی‌ساکاریدهای موجود در صمغ بر میزان ویسکوزیته برشی و سایر خصوصیات رئولوژیک بیوپلیمرها اثر می‌گذارد (Rao *et al*, 1982).





شکل 2- رفتار جریانی تیمارهای بتاگلوکان یولاف

A) کنترل، **B**) دقیقه 10- 110°C، **C**) دقیقه 10- 120°C، **D**) دقیقه 10- 130°C، **E**) دقیقه 20- 110C، **F**) دقیقه 20- 120°C، **G**) دقیقه 20- 130°C

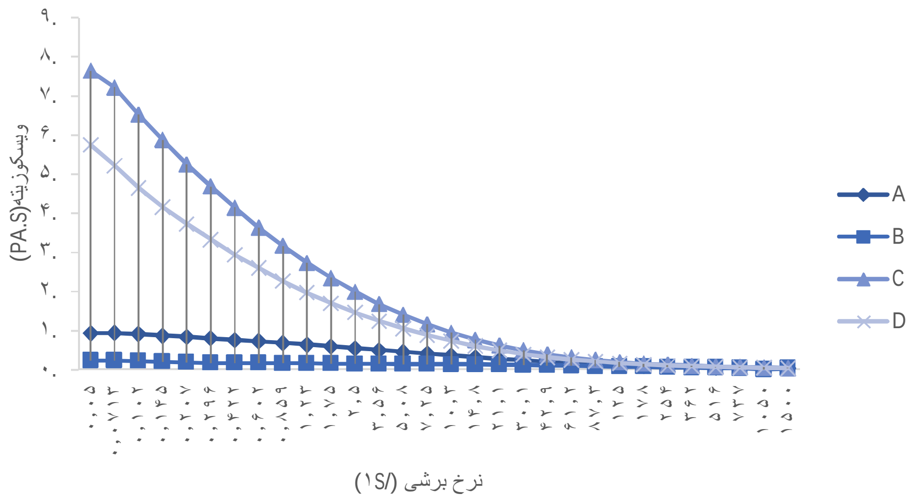
مقدار ویسکوزیته در سرعت برش پایین، مسئول ایجاد قوام در فراورده‌های غذایی است. در حالی که مقدار ویسکوزیته در سرعت برشی بالا بیانگر ویسکوزیته فراورده در مراحل مختلف فرایند است (Edvin and Taylor, 1983).

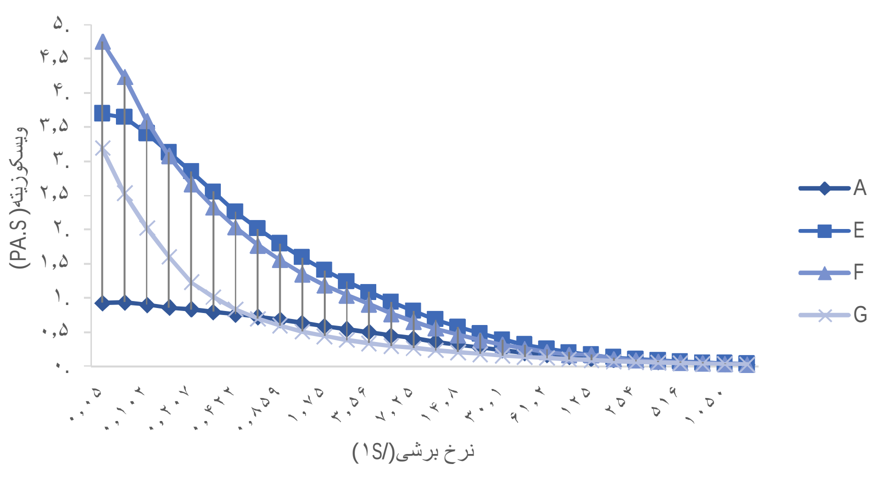
واحدهای گلوکان متشکل از پیوندهای B(1-4)، قابل انعطاف هستند و توانایی تجمع بین زنجیره‌ای را از طریق تشکیل منطقه اتصال دارند، پس از این رو حلالیت کمتری دارند. در حالیکه پیوند B(1-3) دنباله پیوند B(1-4) را قطع می‌کند و باعث پیچ خوردگی در زنجیره شده و آن را محلول‌تر می‌کند (Liu *et al*, 2015). بنابراین بتاگلوکان با نسبت DP3/DP4 پایین‌تر، تمایل بیشتری به فعل و انفعالات مولکولی دارد که مقاومت بیشتری در برابر جریان و در نتیجه محلول چسبناک و ویسکوز بالایی را تولید می‌کند. Ryu و همکاران (2012) گزارش دادند که بتاگلوکان یولاف نسبت به جو به علت بالابودن مقدار پیوند B (1-4) نسبت به B (1-3)، ویسکوزیته بالاتری را ایجاد می‌کند. همچنین رفتار رقیق‌شونده با برش پلی‌ساکاریدها به دلیل بالابودن تجزیه مناطق محل اتصال نسبت به اصلاح آن‌ها در سرعت‌های برشی بالا، به‌وجود می‌آید (Jabeen *et al*, 2015).

اعتقاد بر این است که طبیعت ویسکوز و چسبناک بتاگلوکان عامل اصلی تاثیر بر اثرات سلامتی‌بخش آن است. رفتار رئولوژیکی رقیق‌شونده با برش پلی‌ساکاریدها احساس خوبی در دهان ایجاد می‌کند

و به‌دلیل داشتن ویسکوزیته پایین در سرعت برشی بالا، می‌توان انرژی کمتری صرف کرد، بنابراین مزایای بسیاری در صنعت فراوری مواد غذایی به وجود می‌آورد (Xu *et al*, 2013). عقدایی و همکاران (1389) در پژوهش خود، کاهش ویسکوزیته با افزایش سرعت برشی را بیان کردند. آن‌ها بیان کردند، کاهش ویسکوزیته با افزایش سرعت برشی، به عدم درگیری زنجیره‌های ماکرومولکولی تحت تاثیر میدان برشی (به دلیل همراستا شدن با جهت برش) و نیز شکستن احتمالی ساختمان پلیمرها در محلول بستگی دارد. در واقع کاهش ویسکوزیته ظاهری با افزایش نرخ برش، به افزایش جهت‌گیری پلی‌ساکاریدهای سازنده در اثر نرخ برش، نسبت داده می‌شود.

در پژوهشی دیگر که Irakli و همکاران (2004) بر روی ویژگی‌های رئولوژیکی محلول بتاگلوکان 6 رقم جو یونانی انجام دادند، اثر رقیق‌شوندگی با برش آن‌را تایید کردند. میزان ویسکوزیته و اثر رقیق‌شوندگی با برش بتاگلوکان حاصل از استخراج به روش آب داغ نسبت به دو روش دیگر به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر بود. در واقع به دلیل میزان خلوص بتاگلوکان استخراج شده به روش آب داغ ویسکوزیته ظاهری آن بالاتر می‌باشد. از طرفی در محلول‌هایی با ویسکوزیته بالاتر با افزایش میزان سرعت برشی، مولکول‌های بتاگلوکان از حالت در هم پیچیده خارج شده و حالت خطی به‌خود گرفته و اثر رقیق‌شوندگی با برش بالاتری نسبت به بتاگلوکان استخراجی با روش قلیایی که تجمع مولکول‌های بتاگلوکان در آن کمتر است، از خود نشان می‌دهند. این رفتار نشان‌دهنده رفتار رقیق‌شونده با برش محلول‌های بتاگلوکان می‌باشد





شکل 3- روند تغییرات ویسکوزیته ظاهری نسبت به سرعت برشی تیمارهای بتاگلوکان یولاف

A) کنترل، **B**) دقیقه 10- 110°C، **C**) دقیقه 10- 120°C، **D**) دقیقه 10- 130°C، **E**) دقیقه 20- 110C، **F**) دقیقه 20- 120°C، **G**) دقیقه 20- 130°C

نمودارهای رفتار جریانی با مدل‌های رئولوژیکی مختلف توان، هرشل- بالکلی و بینگهام تطبیق داده شد که در جدول3 نشان داده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده مدل مناسب برای توصیف رفتار جریان، با توجه به ضریب همبستگی (R^2) (در محدوده 0/98-0/94)، مدل هرشل- بالکلی می‌باشد اما با توجه به این‌که مقادیر تنش تسلیم به‌دست آمده منفی می‌باشد لذا این مدل رد و مدل توان به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. نتایج نشان داد که مقادیر n کمتر از 1 هستند که بیانگر رفتار غیرنیوتنی و از نوع سودوپلاستیک نمونه‌ها است. در این نمونه‌ها با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته کاهش می‌یابد. شاخص قوام k نشانگر قدرت استحکام ساختاری محلول است که نمونه C بیشترین مقدار k، پس بیشترین استحکام را داشت. نمونه B بیشترین مقدار n را در مدل هرشل- بالکلی داشت. محلول صمغ با میزان بالای n تمایل دارد که در دهان حالت لزجی و چسبندگی ایجاد کند. هنگامی‌که ویسکوزیته بالا و احساس دهانی مطلوب مورد نیاز است، نمونه‌ای را باید انتخاب کردکه مقدار n پایینی داشته باشد. چنین نمونه‌هایی برای به‌کارگیری در فرمولاسیون‌هایی که بافت لزجی کمتر یا احساسی دهانی مطلوب‌تر مورد نیاز است، بسیار مناسب است.

جدول 3- پارامترهای حاصل از آزمون رفتار جریانی بر روی تیمارهای بتاگلوکان

قانون توان	K(pa.s^n)	n	R^2
B	$0/158\pm0/001^{e}$	$0/82\pm0/003^{a}$	0/76
C	$2/53\pm0/03^{a}$	$0/47\pm0/003^{e}$	0/86
D	$1/87\pm0/05^{b}$	$0/48\pm0/001^{de}$	0/88
E	$1/51\pm0/22^{c}$	$0/53\pm0/02^{cd}$	0/8
F	$1/38\pm0/24^{c}$	$0/51\pm0/04^{de}$	0/89
G	$0/65\pm0/14^{d}$	$0/56\pm0/02^{c}$	0/99
A	$0/57\pm0/04^{d}$	$0/65\pm0/01^{b}$	0/68
بینگهام	σ_0	η_P	R^2
B	$0/014\pm0/0005^{e}$	$0/055\pm0/0006^{cd}$	0/33
C	$0/709\pm0/03^{a}$	$0/065\pm0/0008^{a}$	0/44
D	$0/519\pm0/02^{ab}$	$0/058\pm0/0009^{cb}$	0/47
E	$0/337\pm0/11^{bc}$	$0/06\pm0/001^{b}$	0/47
F	$0/42\pm0/193^{bc}$	$0/052\pm0/002^{d}$	0/50
G	$0/248\pm0/07^{cd}$	$0/047\pm0/031^{e}$	0/56
A	$0/076\pm0/012^{de}$	$0/054\pm0/0008^{cd}$	0/47

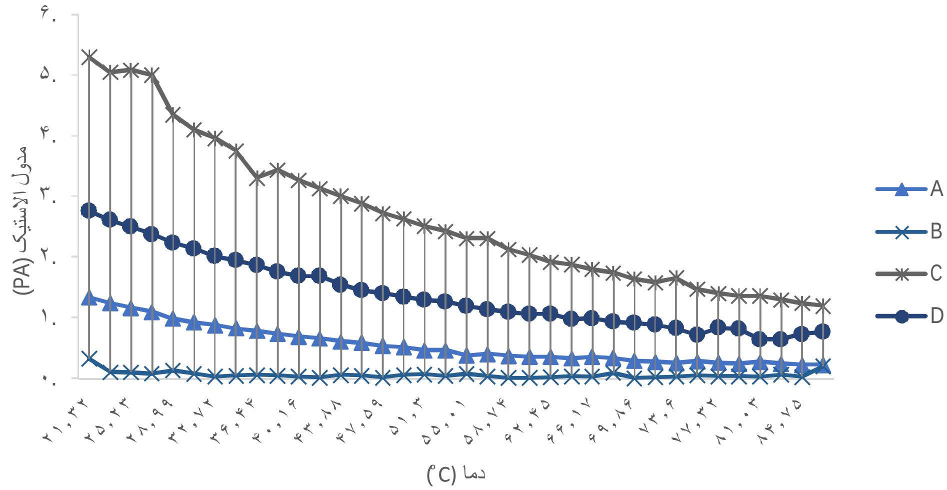
هرشل- بالکلی	σ_β	K(pa.s^n)	n	R^2
B	$-0/006\pm 0^{b}$	$0/174\pm0/002^{f}$	$0/78\pm0/003^{f}$	0/92
C	$-0/96\pm 0/01^{g}$	$3/97\pm0/009^{a}$	$0/37\pm0/0002^{e}$	0/98
D	$-0/56\pm 0/002^{f}$	$2/74\pm0/05^{b}$	$0/41\pm0/0004^{d}$	0/98
E	$-0/41\pm 0/03^{e}$	$2/2\pm0/2^{c}$	$0/45\pm0/015^{c}$	0/97
F	$-0/24\pm 0/04^{d}$	$1/782\pm0/15^{d}$	$0/45\pm0/15^{c}$	0/98
G	$0/06\pm 0/02^{a}$	$0/534\pm0/11^{e}$	$0/6\pm0/02^{b}$	0/99
A	$-0/09\pm 0/01^{c}$	$0/819\pm0/06^{e}$	$0/58\pm0/015^{b}$	0/94

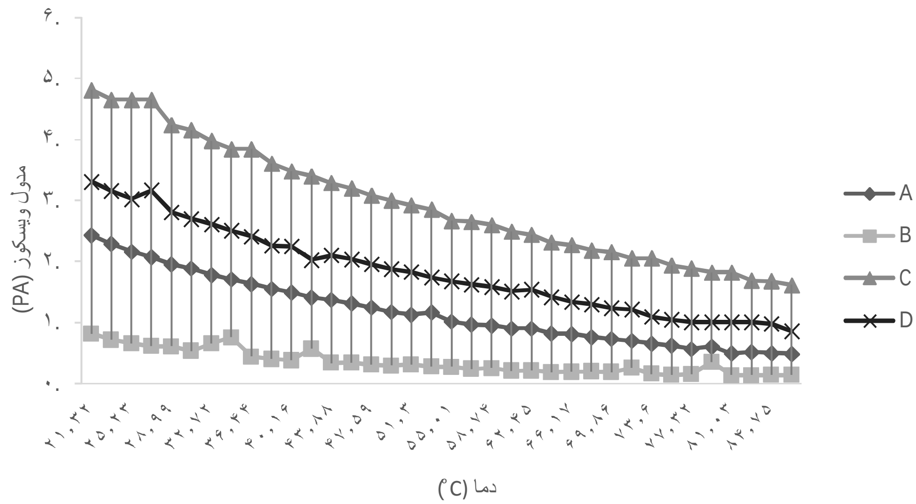
A) کنترل، **B**) دقیقه 10- 110°C، **C**) دقیقه 10- 120°C، **D**) دقیقه 10- 130°C، **E**) دقیقه 20- 110C، **F**) دقیقه 20- 120°C، **G**) دقیقه 20- 130°C

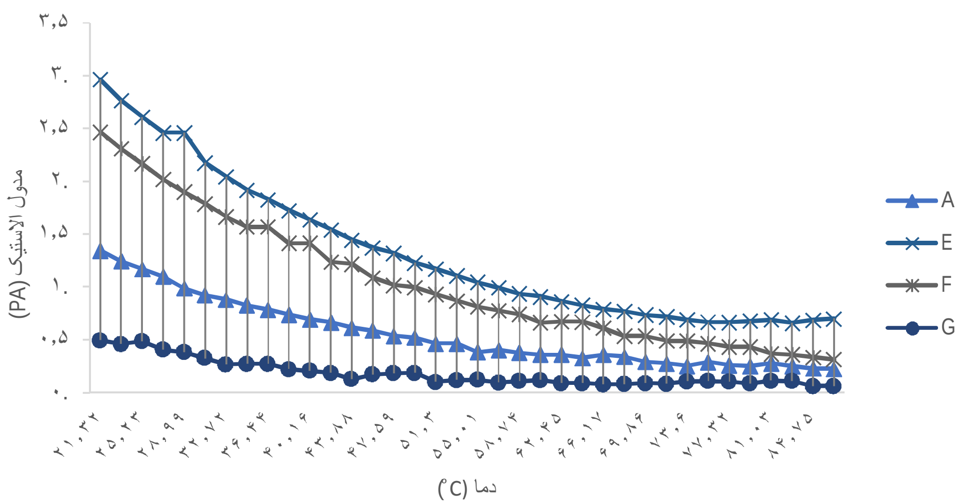
*حروف یکسان در هر ستون، نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح 5 درصد است.

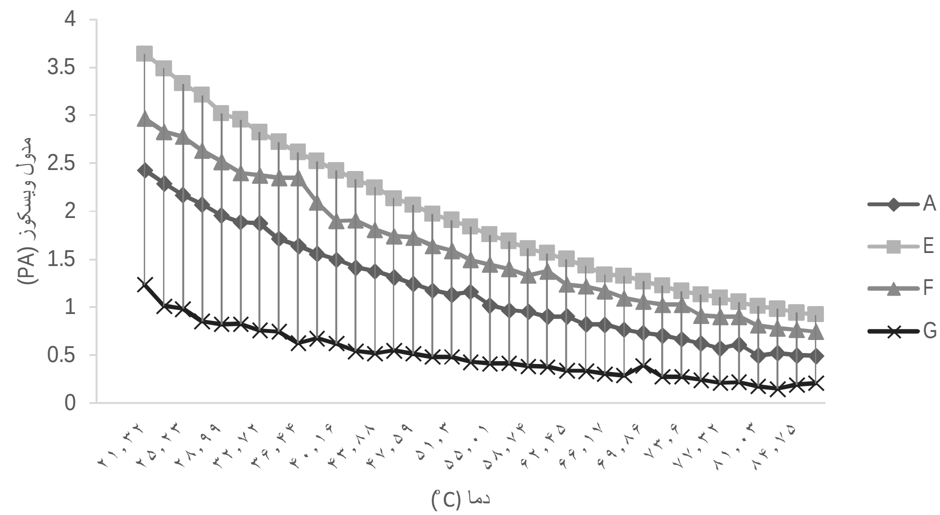
روبش دما

محلول‌های آماده شده پس از گذراندن مراحل آماده‌سازی و حداکثر جذب آب در دمای 4 درجه سانتی‌گراد در یخچال، به‌منظور بررسی اثر گرم کردن روی خصوصیات رئولوژیکی محلول‌ها مورد این آزمون قرار گرفتند. نمونه‌های مختلف بتاگلوکان استخراج شده از تیمارهای مختلف در معرض آزمون روبش دما قرار گرفتند و خصوصیات رئولوژیکی آنها با افزایش دما اندازه‌گیری شد.


۶۰
۵۰
۴۰
۳۰
۲۰
۱۰
۰
مدول الاستیک (PA)
۲۱,۳۲
۲۵,۲۳
۲۸,۹۹
۳۲,۷۲
۳۶,۴۴
۴۰,۱۶
۴۳,۸۸
۴۷,۵۹
۵۱,۳
۵۵,۰۱
۵۸,۷۴
۶۲,۴۵
۶۶,۱۷
۶۹,۸۶
۷۳,۶
۷۷,۳۲
۸۱,۰۳
۸۴,۷۵
دما (C°)
A
B
C
D


۶۰
۵۰
۴۰
۳۰
۲۰
۱۰
۰
مدول ویسکوز (PA)
۲۱,۳۲
۲۵,۲۳
۲۸,۹۹
۳۲,۷۲
۳۶,۴۴
۴۰,۱۶
۴۳,۸۸
۴۷,۵۹
۵۱,۳
۵۵,۰۱
۵۸,۷۴
۶۲,۴۵
۶۶,۱۷
۶۹,۸۶
۷۳,۶
۷۷,۳۲
۸۱,۰۳
۸۴,۷۵
دما (C°)
A
B
C
D


۳,۵
۳۰
۲,۵
۲۰
۱,۵
۱۰
۰,۵
۰
مدول الاستیک (PA)
۲۱,۳۲
۲۵,۲۳
۲۸,۹۹
۳۲,۷۲
۳۶,۴۴
۴۰,۱۶
۴۳,۸۸
۴۷,۵۹
۵۱,۳
۵۵,۰۱
۵۸,۷۴
۶۲,۴۵
۶۶,۱۷
۶۹,۸۶
۷۳,۶
۷۷,۳۲
۸۱,۰۳
۸۴,۷۵
دما (C°)
A
E
F
G



شکل 4- روند تغییرات مدول الاستیک و مدول ویسکوز تیمارهای بتاگلوکان یولاف نسبت به تغییرات دما

A) کنترل، **B**) دقیقه 10- 110°C، **C**) دقیقه 10- 120°C، **D**) دقیقه 10- 130°C، **E**) دقیقه 20- 110C، **F**) دقیقه 20- 120°C، **G**) دقیقه 20- 130°C

*حروف یکسان در هر ستون، نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح 5 درصد است.

دمای نمونه‌ها از 20 تا 85 درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و سپس از 85 درجه سانتی‌گراد تا 20 درجه سانتی‌گراد خنک شده است. گرمایش و سرمایش با سرعت 3 درجه سانتی گراد بر دقیقه بود. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل مدول الاستیک G′ و مدول ویسکوز G″ بودند که در شکل4 نشان داده شده است. مقدار G′ و G″ در نمونه C از بقیه تیمارها بیشتر بود. همانطور که در شکل 4 مشهود است مدول افت و مدول ذخیره با افزایش دما در تمامی نمونه‌ها کاهش یافت.

افزایش خطی مدول افت و مدول ذخیره در خنک کردن نمونه‌ها از 85 تا 20 درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. این رفتار می‌تواند مربوط به کاهش آنتروپی باشد که نیروهای جذبی مانند نیروهای واندروالس و پیوند هیدروژنی، بین ذرات ژل را تقویت می‌کند (Manoj et al, 1997).

فرایند ژل شدن شامل تبدیل محلول مایع از ماکرومولکول‌ها با ذرات، به شکل جامد الاستیک است. دمای ذوب بیوپلیمرها به‌عنوان درجه حرارتی که در آن مدول الاستیک برابر مدول ویسکوز است، (تبدیل ژل- سل) تعریف شده است (Djabourov *et al*, 1988).

روبش فرکانس

روبش فرکانس در منطقه ویسکوالاستیک خطی در فرکانس 100- 0/1 انجام شد. همانطور که در شکل 5 مشاهده می‌شود، در فرکانس‌های پایین‌تر، G″ از G′ بزرگتر است و هر دو با افزایش فرکانس افزایش می‌یابند.

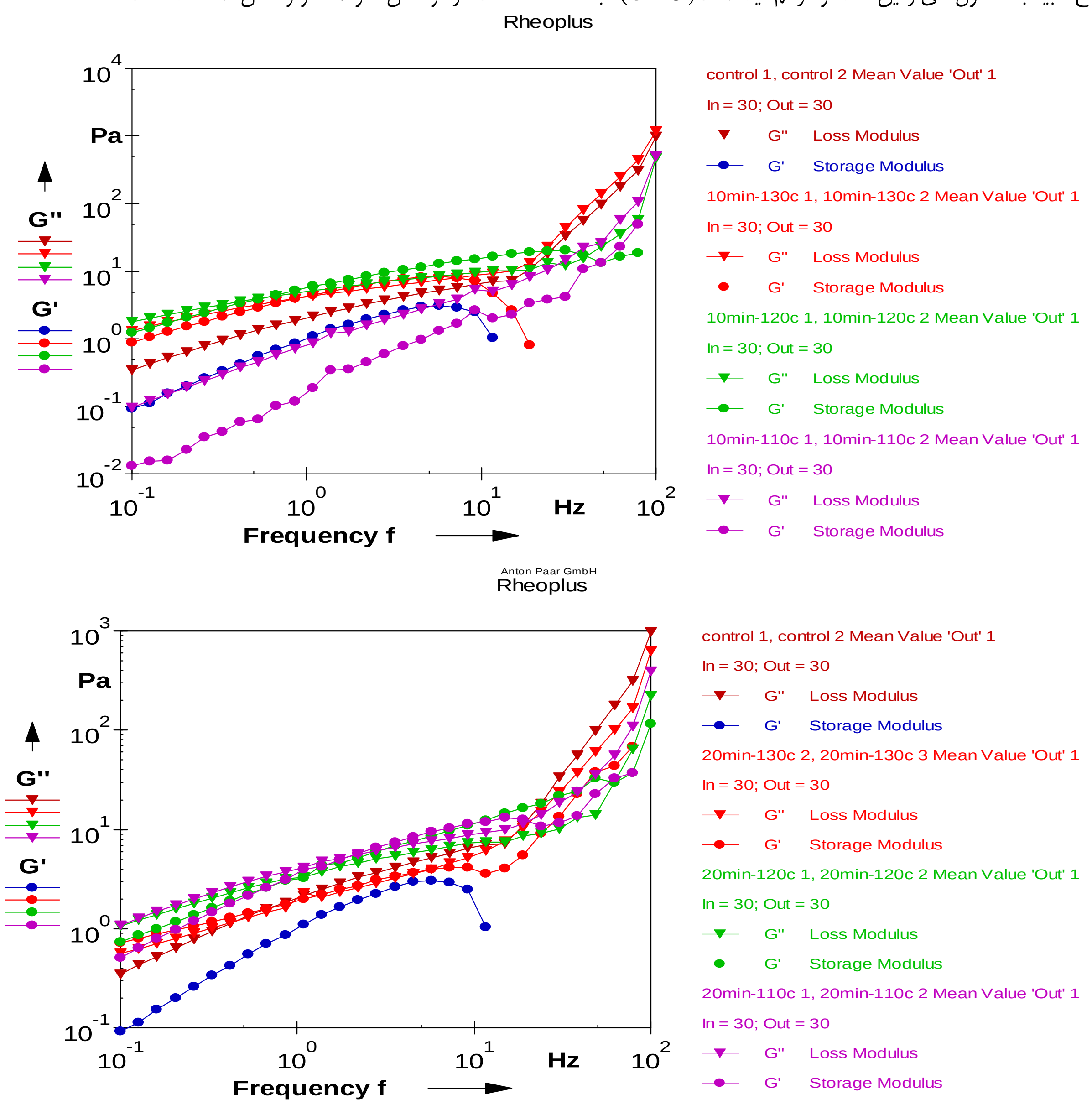
جدول 4- مقادیر پارامترهای مختلف حاصل از تغییرات فرکانس بر روی تیمارهای بتاگلوکان

10(Hz)				1(Hz)				
η*(Pa.s)	tan(σ)	G″(Pa)	G′(Pa)	η*(Pa.s)	tan(σ)	G″(Pa)	G′(Pa)	تیمار
0/11	3/225	6/645	2/063	0/363	2/01	2/043	1/0165	A
0/092	3/025	5/051	2/567	0/132	5/18	0/816	0/16	B
0/293	0/621	9/709	15/689	1/216	0/887	5/069	5/719	C
0/175	1/494	8/843	6/618	0/949	0/977	4/167	4/263	D
0/234	0/779	8/875	11/673	1/105	1/105	4/02	3/326	E
0/215	0/65	7/374	11/339	1/042	1/042	3/246	3/192	F
0/108	1/748	5/129	4/057	1/07	1/07	2/014	1/942	G

A) کنترل، **B**) دقیقه 10- 110°C، **C**) دقیقه 10- 120°C، **D**) دقیقه 10- 130°C، **E**) دقیقه 20- 110C، **F**) دقیقه 20- 120°C، **G**) دقیقه 20- 130°C

در حالی‌که رفتار به مواد جامد مانند در فرکانس‌های بالاتر نزدیک می‌شود. در صورت ایجاد یک ژل ایده‌آل (رفتار کاملا الاستیک) انتظار می‌رود G' بسیار بزرگتر از G'' و مستقل از فرکانس باشد. شروع ناحیه الاستیک وقتی است که G' از G'' بزرگتر می‌شود. در فرکانس‌های پایین‌تر، G'' از G' بزرگتر است و هر دو با افزایش فرکانس افزایش می‌یابند. در فرکانس‌های کم، در حالی‌که زمان کافی برای درهم ریختگی و ساختن و شکستن در مدت طولانی از نوسان وجود دارد، پاسخ شبیه به محلول‌های رقیق نشده و درهم‌تنیده است($G''>G'$) . با توجه به شکل زیر وابستگی بیشتر را در فرکانس بالا برای G' و G'' شاهد هستیم زیرا شیب افزایش می‌یابد که این می‌تواند ضعف ساختار ژل را نشان دهد (رافع و همکاران، 2013). همانطور که در جدول 4 مشخص است مقدار G' و G'' و η^* تیمار C از سایر تیمارها در فرکانس 1 و 10 هرتز بیشتر است.

در جدول 4 مقادیر میانگین G'، G''، $\tan(\sigma)$ و ویسکوزیته کمپلکس (η^*) از دو تکرار نمونه بتاگلوکان استخراج شده از تیمارهای مختلف در فرکانس 1 و 10 هرتز نشان داده شده است.



شکل 5- روند تغییرات مدول الاستیک و مدول ویسکوز تیمارهای بتاگلوکان یولاف نسبت به تغییرات فرکانس

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر شرایط هیدروترمال بر روی آرد یولاف در دما و زمان‌های مختلف و استخراج بتاگلوکان از آنها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده، فرایند هیدروترمال باعث اثر تفاوت معنی‌داری در حلالیت، کف‌کنندگی و پایداری کف و خصوصیات رئولوژیکی بتاگلوکان شد. بهترین شرایط هیدروترمال بر روی استخراج با توجه به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رفتار جریان و آزمون نوسانی شامل روبش دما و نیز کف‌کنندگی و پایداری کف و حلالیت در سه دمای 25، 50 و 75 درجه سانتی‌گراد بتاگلوکان به‌عنوان یک هیدروکلوئید با خواص عملکردی بالا مشخص شد. بتاگلوکان حاصل از آرد یولاف هیدروترمال شده در 120 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه بالاترین حلالیت را در 25 درجه سانتی‌گراد و کمترین حلالیت را در دمای 50 درجه سانتی‌گراد و تیمار 120 درجه سانتی‌گراد به مدت 20 دقیقه بیشترین حلالیت را در 75 درجه سانتی‌گراد داشت. میزان کف‌کنندگی بتاگلوکان استخراجی از آرد یولاف هیدروترمال شده در دمای 130درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه، از سایر تیمارها کمتر بود و بتاگلوکان حاصل از تیمار هیدروترمال شده در دمای 110 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه از ثبات کف بالاتری برخوردار بود. عامل کف‌کنندگی و پایداری کف یکی از ویژگی‌های عملکردی مهم بتاگلوکان جهت استفاده از آن به عنوان ترکیب بهبوددهنده بافت فراورده‌های نانوایی می‌باشد. به این دلیل که هرچه میزان کف‌کنندگی و پایداری کف بیشتر باشد، جهت استفاده در فرمولاسیون خمیر نان و کیک مناسب‌تر است. در بررسی خصوصیات رئولوژیکی، تاثیر سرعت برشی بر ویسکوزیته در تمامی نمونه‌ها کاهش یافت و بتاگلوکان حاصل از آرد یولاف هیدروترمال شده در 120 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه بیشترین مقدار ویسکوزیته را داشت و از این تیمار می‌توان به‌عنوان عامل قوام‌دهنده جهت بهبود بافت و ویژگی‌های رئولوژیکی فرآورده‌ها و فرمولاسیون مواد غذایی استفاده کرد .در آزمون نوسانی روبش دما، مقدار G' و G'' در تمامی نمونه‌ها کاهش یافت و بیشترین مقدار G' و G'' را نمونه بتاگلوکان حاصل از آرد یولاف هیدروترمال شده در 120 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه داشت. در روبش فرکانس در فرکانس‌های پایین‌تر، G'' از G' بزرگتر است و هر دو با افزایش فرکانس افزایش می‌یابند و مقدار G' و G'' و η^* تیمار C از سایر تیمارها در فرکانس 1 و 10 هرتز بیشتر است.

منابع

AACC (2000) Approved methods of the American association of cereal chemists.10th edition, Minesota.

AOAC (2005) Official method of Analysis. 18th Edition, Association of Officiating Analytical Chemists, Washington DC, Method 935.14 and 992.24.

Ahmad, A., Anjum, F. M., Zahoor, T., Nawaz, H., & Din, A. (2009). Physicochemical and functional properties of barley β-glucan as affected by different extraction procedures. *International journal of food science & technology*, 44(1), 181-187.

Alghooneh, A., Razavi, S. M. A., & Behrouzian, F. (2017). Rheological characterization of hydrocolloids interaction: A case study on sage seed gum-xanthan blends. *Food Hydrocolloids*, 66, 206-215.

Alghooneh, A., Razavi, M.A., Behrouzian, F., (2017). Rheological characterization of hydrocolloids interaction: A case study on sage seed gum-xanthan blends. *Food Hydrocolloids*,66,1-10.

Amiri Oghdai, S. S., Aalami, M., Jafari, S. M., Sadeghi Mahonak, A., (1389). Physicochemical and Rheological Properties of Beta-Glucan Extracted from Hull-Less Barlay. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 6 (4): 286-296. [in Persian].

Khan, A. A., Gani, A., Masoodi, F. A., Amin, F., Wani, I. A., Khanday, F. A., & Gani, A. (2016). Structural, thermal, functional, antioxidant & antimicrobial properties of β-d-glucan extracted from baker's yeast (Saccharomyces cereviseae)—Effect of γ-irradiation. *Carbohydrate polymers*, 140, 442-450.

Behrouzian, F., Razavi, S. M., & Alghooneh, A. (2017). Evaluation of interactions of biopolymers using dynamic rheological measurements: Effect of temperature and blend ratios. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(5).

Betancur-Ancona, D., Lopez-Luna, J., & Chel-Guerrero, L. (2003). Comparison of the chemical composition and functional properties of Phaseolus lunatus prime and tailing starches. *Food Chemistry*, 82(2), 217-225.

Brennan, C. S., & Cleary, L. J. (2005). The potential use of cereal (1→ 3, 1→ 4)-β-D-glucans as functional food ingredients. *Journal of cereal Science*, 42(1), 1-13.

Burkus, Z., & Temelli, F. (1998). Effect of extraction conditions on yield, composition, and viscosity stability of barley β-glucan gum. *Cereal Chemistry*, 75(6), 805-809.

Burkus, Z., & Temelli, F. (2005). Rheological properties of barley β-glucan. Carbohydrate Polymers, 59(4), 459-465.

Butt, M. S., Tahir-Nadeem, M., Khan, M. K. I., Shabir, R., & Butt, M. S. (2008). Oat: unique among the cereals. *European journal of nutrition*, 47(2), 68-79.

Castellani, O and Al-Assaf, S., (2010). Hydrocolloids with emulsifying capacity. Part 2-adsorption properties at the n-hexadecane–Water interface. *Food hydrocolloids* 24: 121-130.

Descroix, K., Ferrières, V., Jamois, F., Yvin, J. C., & Plusquellec, D. (2006). Recent progress in the field of β-(1, 3)-glucans and new applications. *Mini reviews in medicinal chemistry*, 6(12), 1341-1349.

Djabourov, M., Leblond, J., & Papon, P. (1988). Gelation of aqueous gelatin solutions. I. Structural investigation. Journal de physique, 49(2), 319-332.

Doehlert, D.C., Angelikousis, S., Vick, B., (2010). Accumulation of oxygenated fatty Acids in oat lipids during Storage. *Cereal Chemistry*, 87(6), 532–537.

Edvin, R., Morris, L., Taylor, J., Norman Cutler, A ., (1983). Oral perception of viscosity in fluid foods and model systems. *Journol of Texture Studies*, 14(4), 377-395.

Gamel, T. H., Abdel-Aal, E. S. M., Ames, N. P., Duss, R., & Tosh, S. M. (2014). Enzymatic extraction of beta-glucan from oat bran cereals and oat crackers and optimization of viscosity measurement. *Journal of Cereal Science*, 59(1), 33-Gardiner T., (2000). Beta–glucan biological activities: A review. Glycosci.1:1–6.

Grundy, M. M. L., Quint, J., Rieder, A., Ballance, S., Dreiss, C. A., Butterworth, P. J., & Ellis, P. R. (2017). Impact of hydrothermal and mechanical processing on dissolution kinetics and rheology of oat β-glucan. Carbohydrate polymers, 166, 387-397.

Horwitz, W., (2002). Of cial Methods of Analysis (17th ed.), Association of Official Analytical Chemists, Inc.: Gaithersburg, USA.

Irakli, M., Biliaderis, C. G., Izydorczyk, M. S., & Papadoyannis, I. N. (2004). Isolation, structural features and rheological properties of water-extractable β-glucans from different Greek barley cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(10), 1170-1178.

Jabeen, S., Chat, O. A., Maswal, M., Ashraf, U., Rather, G. M., & Dar, A. A. (2015). Hydrogels of sodium alginate in cationic surfactants: Surfactant dependent modulation of encapsulation/release toward Ibuprofen. *Carbohydrate polymers*, 133, 144-153.

Karaman, S., Yilmaz, M. T., & Kayacier, A. (2011). Simplex lattice mixture design approach on the rheological behavior of glucomannan based salep-honey drink mixtures: An optimization study based on the sensory properties. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 1319-1326.

Khan, A. A., Gani, A., Masoodi, F. A., Amin, F., Wani, I. A., Khanday, F. A., and Gani, A., (2016). Structural, thermal, functional, antioxidant and antimicrobial properties of rm Beta-D-glucan extracted from baker's yeast (Saccharomyces cereviseae) - Effect of rmgamma-irradiation, *Carbohydrate Polymers*. 140, 442-450.

Kerckhoffs, D. A., Brouns, F., Hornstra, G., & Mensink, R. P. (2002). Effects on the human serum lipoprotein profile of β-glucan, soy protein and isoflavones, plant sterols and stanols, garlic and tocotrienols. *The Journal of nutrition*, 132(9), 2494-2505.

Liu, R., Li, J., Wu, T., Li, Q., Meng, Y., & Zhang, M. (2015). Effects of ultrafine grinding and cellulase hydrolysis treatment on physicochemical and rheological properties of oat (*Avena nuda* L.) β-glucans. *Journal of cereal science*, 65, 125-131.

Lazaridou, A., & Biliaderis, C. G. (2007). Molecular aspects of cereal β-glucan functionality: Physical properties, technological applications and physiological effects. *Journal of cereal science*, 46(2), 101-118.

Lee, S. H., Jang, G. Y., Kim, M. Y., Hwang, I. G., Kim, H. Y., Woo, K. S., & Jeong, H. S. (2016). Physicochemical and in vitro binding properties of barley β-glucan treated with hydrogen peroxide. *Food chemistry*, 192, 729-735.

Izydorczyk, M. S., & Dexter, J. E. (2008). Barley β-glucans and arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products–a Review. Food Research International, 41(9), 850-868.

attila, P., Pihlava, J. M., & Hellström, J. (2005). Contents of phenolic acids, alkyl-and alkenylresorcinols, and avenanthramides in commercial grain products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(21), 8290-8295.

Mandala, I. G., Savvas, T. P., & Kostaropoulos, A. E. (2004). Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce. *Journal of Food Engineering*, 64(3), 335-342.

Manoj, P., Kasapis, S., & Hember, M. W. (1997). Sequence-dependent kinetic trapping of biphasic structures in maltodextrin-whey protein gels. *Carbohydrate Polymers*, 32(2), 141-153.

Pourmohammadi, K., Aalami, M., Shahedi, M., Sadeghi Mahoonak, A., (1390). Effect of microbial transglutaminase on dough rheological properties of wheat flour supplemented with hull-less barley flour. *Journal of Food Science and Technology*, 21: 269-279. [in Persian].

Rao, M. A., & Anantheswaran, R. C. (1982). Rheology of fluids in food-processing. *Food Technology*, 36(2), 116-126.

Rafe, A., Razavi, S. M., & Farhoosh, R. (2013). Rheology and microstructure of basil seed gum and β-lactoglobulin mixed gels. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 134-142.

Ryu, J. H., Lee, S., You, S., Shim, J. H., & Yoo, S. H. (2012). Effects of barley and oat β-glucan structures on their rheological and thermal characteristics. *Carbohydrate polymers*, 89(4), 1238-1243.

Shah, A., Gani, A., Ahmad, M., Ashwar, B. A., & Masoodi, F. A. (2016). β-Glucan as an encapsulating agent: Effect on probiotic survival in simulated gastrointestinal tract. *International journal of biological macromolecules*, 82, 217-222.

Skendi, A., Papageorgiou, M., & Biliaderis, C. G. (2009). Effect of barley β-glucan molecular size and level on wheat dough rheological properties. *Journal of Food Engineering*, 91(4), 594-601.

Skendi, A., Biliaderis, C. G., Lazaridou, A., & Izydorczyk, M. S. (2003). Structure and rheological properties of water soluble β-glucans from oat cultivars of Avena sativa and Avena bysantina. *Journal of cereal science*, 38(1), 15-31.

Temelli, F. (1997). Extraction and functional properties of barley β-glucan as affected by temperature and pH. Journal of food science, 62(6), 1194-1201.

Wood, P. J. (2007). Cereal β-glucans in diet and health. *Journal of cereal science*, 46(3), 230-238.

Worrasinchai, S., Suphantharika, M., Pinjai, S., & Jamnong, P. (2006). β-Glucan prepared from spent brewer's yeast as a fat replacer in mayonnaise. *Food hydrocolloids*, 20(1), 68-78.

Xu, J., Inglett, G. E., Chen, D., & Liu, S. X. (2013). Viscoelastic properties of oat β-glucan-rich aqueous dispersions. *Food chemistry*, 138(1), 186-191.

Zhu, F., Du, B., & Xu, B. (2016). A critical review on production and industrial applications of beta-glucans. *Food Hydrocolloids*, 52, 275-288.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 2, June. July. 2020, p. 271- 286

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 2، خرداد-تیر 1399 ص. 286-271

The effect of hydrothermal processing on rheological properties of oat β-glucan

A. Sattari[1], J. Mohammadzadeh Milani[2]*, Z. Raftani Amiri[2], A. Pakdin Parizi[3]

Received: 2019.08.18
Accepted: 2019.10.09

Introduction: Oat establishes a healthy basis for food products. It has gained relevance in human nutrition because it is one of the few cereals with high content of soluble fiber namely β -glucan, and is a good source of proteins, vitamins, and minerals (Butt et al., 2008). β-glucan is one such polysaccharide that has received much attention from past few years due to its several health beneficial properties, including the ability to remove free radicals in a way identical to antioxidants (Gardiner, 2000). β-glucan is an unbranched polysaccharide consisting of β-D-glucopyranose units linked through (1→4) and (1→3) glycosidic bonds in cereals and (1→6) glycosidic bonds in fungal sources (Ahmad et al., 2016). β-glucan from different sources vary in their molecular structure, chain conformation, solubility, number of β-(1→3)- or β-(1→6)-linkage, and thus different biological activities (Descroix et al., 2006). β-glucan is regarded as an important functional ingredient to lower serum cholesterol, promote weight management, reduce glycemic response, enhance immune system, besides having a prebiotic effect (Zhu et al., 2016; Shah et al., 2016). β–glucan from barley and oat at a 3 g/day dosage as recommended by FDA would reduce cardiovascular disease risk including reduction in blood glucose and also has satiety effects. Therefore, in order to meet the demands of people related to diets that has low glycemic index and antioxidant property, non-starch polysaccharides like β-glucan can be used as an ingredient in the products to develop new functional foods (Lee et al., 2016). Oat grain's fat content is more than that of wheat and it is full of lipase, lipoxygenase, and other hydrolytic enzymes. Over time, enzymes lead to the hydrolysis of the fats present in the oat that make the rancidity taste. Due to the effect of enzyme activity on the stability of oat flakes, these enzymes need to be deactivated during oat processing. One of the methods for disabling enzymes is a hydrothermal process (Doehlert et al., 2010). In this study, the effect of hydrothermal process using autoclave on the physical and rheological properties of oat β-glucans in different times and temperatures has been investigated.

Materials and methods: In this study, beta-glucan was extracted from oats using hot water extraction method. Hulled oat grains, it put into autoclave for hydrothermal processing, at three different temperatures of 110, 120 and 130°C in two different time (10 and 20 minutes) intervals, to measure the effect of time and temperature on physiochemical and functional and rheological properties of β-glucan. After extraction, the physiochemical and functional properties of extracted β-glucan such as solubility, foaming, foaming stability and rheological properties were tested. In order to measure the moisture, ash and protein content, the standard methods (AOAC, 2005) were used. The fat content of the flour was measured by the standard AACC method 25-30. The starch was determined by polarimetry method. For solubility measurement, according to Betancur-Anoka (2003) method, after preparing 90 ml of 1% w / v solution from each sample β-glucan, it was divided into 3 equal parts. Then each of them was placed in a warm bath of 25, 50 and 75 °C for 30 minutes. After centrifuging for 15 minutes at about 8000 g, 10 ml of the upper clear solution was transferred to an oven at 125 °C to reach a constant weight. Finally, solubility percentage at different temperatures was calculated.

The foaming capacity and foam stability were studied using the temelli method (1997). For this purpose, 2.5 g, β-glucans was dissolved in 100 mL distilled water. The resulting solution was mixed vigorously for 2 min using a hand held food mixer at high speed in a stainless steel bowl with straight sides and volumes were recorded before and after whipping. To determine foaming capacity, foams were slowly transferred to a 1000 mL graduated cylinder and the volume of foam that remained after staying at 25 ± 2°C for 2 h was expressed as percentage of the initial foam volume (Temelli et al. 1997; Ashraf Khan et al., 2016). β -Glucan gum solutions were prepared in duplicate in the desired concentration (1.0% of gum, w/w) using distilled water. Rheological properties of the samples were studied by an Anton Paar Physica Rheometer (Physica, MCR 301, Anton Paar GmbH, Germany), with a parallel plate geometry.

Results and discussion: β-glucan obtained from hydrothermal process on oat flour at 120°C for 10 minutes had the highest solubility at 25°C and the lowest solubility at 50°C, and 130°C treatment for 10 minutes had the highest solubility

1 and 2. M. Sc. Student and Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3. Assistant Professor, Genetics and Biotechnology Institute, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran Assistant Professor, Genetics and Biotechnology Institute, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran
(* Corresponding author :jmilany@yahoo.com)

at 75°C from hydrothermal process on oat flour at 120°C for 10 minutes had the highest solubility at 25°C, and the treatment of 110°C for 10 minutes and also the treatment of 120°C for 20 minutes had the highest solubility at 50°C and 75°C. The amount of foam in treatment at 130°C for 10 minutes were lower than other treatments and the treatment at 110°C for 10 minutes had the highest foaming stability. In the study of rheological properties, the effect of shear rate on viscosity showed by increasing the shear rate, viscosity decreased in all samples. β-glucan from hydrothermal process on oat flour at 120°C for 10 minutes, had the highest amount of viscosity. In the temperature sweep the parameters included G′ modulus and G″ modulus, the amount of G′ and G″ in β -glucan sample that extracted from hydrothermal process on oat flour were decreased in all samples. Also, G′ and G″ of extracted β-Glucan from hydrothermal process on oat flour at 120°C for 10 minutes was higher than other treatments. In the frequency sweep, at a lower frequency, the amount of G″ was more than G′, and both of them were increased by an increasing frequency and the amount of G′, G″ and η* at 120°C for 10 minutes was higher than other treatments in the frequency of 1 and 10 (Hz). The results showed that the hydrothermal process had a significant effect on the properties and functional properties of β -glucan. Extracted β -glucan sample at 120°C for 10 minutes had the highest solubility at 25°C, and the sample had the lowest solubility at 50°C. The sample treated at 120°C for 20 minutes had the highest solubility at 75°C. The foaming capacity of sample at 130°C for 10 minutes was lower than other treatments and the treatment at 110°C for 10 minutes had the highest foaming stability. In the study of rheological properties, the effect of shear rate on viscosity decreased in all samples and the treatment of 120°C for 10 minutes had the highest amount of viscosity. In temperature sweep measurement, the amount of G′ and G″ were decreased in all samples and at 120°C for 10 minutes it had the highest amount of G′ and G″. In the frequency sweep, at a lower frequency, the amount of G″ was more than G′, and both of them were increased by an increasing frequency and the amount of G′, G″ and η* at 120°C for 10 minutes was higher than other treatments in the frequency of 1 and 10 (Hz).

Keywords: β-glucan, Oat, Hydrothermal processing, Rheological properties